

## **Zerstörungsfreie Bestimmung der Festigkeit von tragenden Bauteilen aus Naturstein**

**M. Weimann und F.H. Wittmann**  
Institut für Baustoffe  
ETH Zürich, Schweiz

### **Zusammenfassung**

In dem vorliegenden Artikel wird die Anwendung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens mittels Ultraschall beschrieben. Dabei wird insbesondere auf die Bestimmung der Festigkeit von Bauteilen aus Naturstein und das Auffinden von Fehlstellen in Natursteinbauteilen eingegangen. Am Beispiel von zwei Natursteinsäulen wird das Vorgehen erläutert. Die zerstörungsfreie Bestimmung der Festigkeit ist insbesondere in dem Fall, bei dem die Bauteile eine tragende Funktion erfüllen von Bedeutung. Eine Entnahme von Bohrkernen zur Bestimmung der Festigkeit könnte in diesem Fall, ohne zusätzliche Maßnahmen, zu einer Beeinträchtigung des Tragvermögens und im schlimmsten Fall zum Einsturz führen. Andererseits verbietet die Bedeutung eines historischen Bauwerkes einen so gravierenden Eingriff. Ein Grund für die Ermittlung der Festigkeit ist die durch das Auftreten von Rissen bedingte Reduktion der Festigkeit. Es sei an dieser Stelle angemerkt, daß es aufgrund des spröden Bruchverhaltens von Naturstein immer zu lokalisierten Rissen kommt. Ursachen der Rißbildung können Verformungen sein, die zum Beispiel bei Erdbeben oder bei Setzungen auftreten und zu Spannungen führen, welche die Festigkeit des Werkstoffes überschreiten. In der Literatur findet man eine stattliche Anzahl von Veröffentlichungen, die sich bereits mit diesem Themenkomplex beschäftigt haben. Eine Auswahl ist am Ende dieser Arbeit aufgeführt.

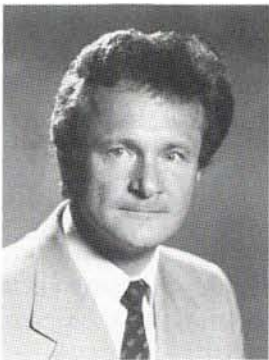
### *Non destructive determination of strength of natural stone structural elements*

#### **Abstract**

The following contribution describes the technique of non destructive determination of strength of natural stone structural elements by means of the ultrasonic pulse velocity. In addition, the determination of internal cracks and defects will be discussed on the bases of two columns from natural stones. The advantage of a non destructive determination of strength is that in the case of historical structures and load bearing members it is not necessary to drill cores for the determination of strength. The formation of cracks and defects leads to a reduction of strength. Causes of crack formation can be deformations which results from earthquakes or ground settlements. The deformations lead to stresses which may be larger than the strength of the material. In the literature one can find a considerable number of papers on this subject. At the end of this contribution same relevant references are compiled.



**M. Weimann**, studierte Physik an der Universität Konstanz und an der TU Berlin. Seit 1992 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe der ETH Zürich. Er befasst sich hauptsächlich mit den Eigenschaften zusammengesetzter Werkstoffe wie Polymerbeton.



**Prof. Dr. F. H. Wittmann**, WTA-Mitglied, studierte zunächst an den Universitäten Karlsruhe und München Physik, 1969 habilitierte er bei Prof. H. Rüschi an der TU München. Seit 1976 ist er ordentlicher Professor für Werkstoffe des Bauwesens, zuerst in Delft, dann in Lausanne und heute an der ETH Zürich. Er befasst sich vorwiegend mit der Dauerhaftigkeit und der Bruchmechanik zementgebundener Werkstoffe.

## 1. Einleitung

Zerstörungsfreie Prüfungen von Werkstoffen mit Hilfe von Ultraschall werden heute in zunehmendem Maße eingesetzt. Dabei reicht das Anwendungsspektrum von dem zerstörungsfreien Auffinden von Werkstofffehlern, über die zerstörungsfreie Dickenmessung bis zur zerstörungsfreien Ermittlung der Festigkeit. Analysiert werden je nach Anwendung entweder die Ultraschallreflexion  $R$  oder bei Durchstrahlung die Ultraschallgeschwindigkeit  $v$  bzw. die Absorption  $A$  eines Ultraschallimpulses. Speziell bei Metallen und Naturstein eignet sich die Durchstrahlung mit Ultraschall, da Ultraschall den Frequenzbereich von  $10^4$  bis  $10^{10}$  Hz umfaßt und die wesentlichen Absorptionsfrequenzen dieser Werkstoffe erst oberhalb von  $10^{10}$  Hz beginnen. Deshalb und wegen seiner Ungefährlichkeit ist Ultraschall zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung meist anderen Strahlungen (Röntgen, hartes UV, Neutronen) überlegen.

Im folgenden werden zuerst die Grundlagen der zerstörungsfreien Meßmethode vorgestellt. Anschließend wird die für die Festigkeitsbestimmung notwendige Aufnahme einer Kalibrierkurve erläutert. Desweiteren wird auf zerstörungsfreie Messungen der Schallgeschwindigkeit  $v$  an tragenden Säulen aus Naturstein und die Korrelation mit der aufgenommenen Kalibrierkurve sowie über das Auffinden von Fehlstellen in den untersuchten Natursteinsäulen eingegangen. Abschließend werden die Möglichkeiten und die Grenzen der vorgeschlagenen Methode aufgezeigt.

## 2. Grundlagen der Meßmethode

Die hier vorgestellte Ultraschallmeßmethode zur zerstörungsfreien Ermittlung der Festigkeit von Säulen aus Naturstein basiert auf der Messung der Ultraschallaufzeit  $\tau$  durch Naturstein. Mit Hilfe der gemessenen Laufzeit  $\tau$  und dem gemessenen durchstrahlten Weg  $s$  berechnet man die Schallgeschwindigkeit  $v$  im Naturstein. Der Meßaufbau ist in der nachfolgenden Abb. 1 schematisch dargestellt. Die stabförmige Probe symbolisiert den Naturstein.

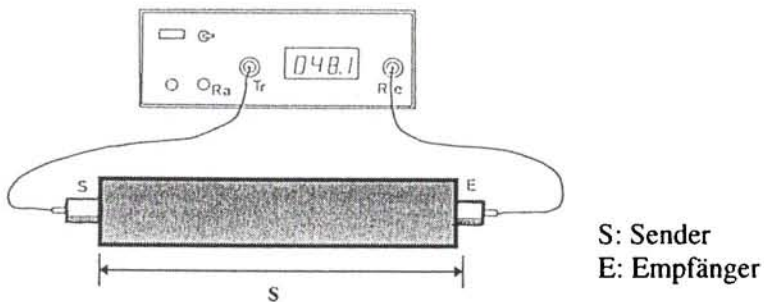


Abb. 1: Schematische Darstellung des Meßaufbaus zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit  $v$  in einer Probe

Fig. 1: Schematic representation of measuring construction for the determination of ultrasonic velocity  $v$

Da es sich bei Ultraschall um elastische Wellen handelt, hängt die Schallgeschwindigkeit  $v$  im Naturstein von dessen elastischen Kenngrößen ab. Diese sind charakterisiert durch den Elastizitätsmodul  $E$  und die Querdehnzahl  $\mu$ . Es sei an dieser Stelle angemerkt, daß es damit prinzipiell möglich ist, bei bekannter Schallgeschwindigkeit  $v$  und Dichte  $\rho$  des Natursteins dessen dynamischen Elastizitätsmodul  $E_{\text{dyn}}$  zu bestimmen.

Eine Auswahl von Publikationen, die sich mit der Anwendung der Ultraschallgeschwindigkeit  $v$  zur Festigkeits- und Fehlstellenbestimmung, sowie zur Abschätzung des Verwitterungszustandes von Natursteinen beschäftigt, ist in den nachfolgenden Literaturstellen zu finden [1]-[5], [8]-[10], [12], [14]-[16].

### **3. Kalibriermessungen an unterschiedlichen Natursteinen**

#### **3.1 Probenentnahme**

Die zerstörungsfreie Bestimmung der Festigkeit wurde an den folgenden drei unterschiedlichen Natursteinen durchgeführt:

- Savonnière-Kalkstein
- Jura-Kalkstein
- Schmerikoner Sandstein

Für die zerstörungsfreie Ermittlung der Druckfestigkeit  $f_c$  ist die Aufnahme von Kalibrierkurven erforderlich, in denen die Druckfestigkeit  $f_c$  als Funktion der Schallgeschwindigkeit  $v$  dargestellt ist. Da die untersuchten Natursteine einen schichtförmigen Aufbau haben wurde an 6 angelieferten Probekörpern (jeweils zwei von jedem Naturstein) mit den Abmessungen  $200 \times 200 \times 450 \text{ mm}^3$  die Festigkeit in allen drei Raumrichtungen bestimmt. Ein kartesisches Koordinatensystem wurde derart angelegt, daß die z-Richtung senkrecht zur Schichtebene liegt und die x-y-Ebene in der Schichtebene (Abb.2). Anschließend wurden in den drei Raumrichtungen die Entnahmestellen von Bohrkernen mit den Durchmessern  $\varnothing = 50 \text{ mm}$  und der Länge  $l = 145 \text{ mm}$  eingezeichnet (Abb.2).

Im Anschluß an die Kennzeichnung der Bohrkernentnahmestellen wurde jeder der 6 prismatischen Probekörper mit den Abmessungen  $200 \times 200 \times 450 \text{ mm}^3$  in jeweils drei gleiche Probekörper (Probekörper o:Oben, Probekörper m:Mitte, Probekörper u:Unten) mit den Abmessungen  $200 \times 200 \times 145 \text{ mm}^3$  naß zersägt. Hierbei entsprechen die Probekörper o der z-Richtung und die Probekörper m und u können der x bzw. y-Richtung zugeordnet werden. Dieser Sachverhalt ist aus der Abb. 2 ersichtlich. Im Anschluß an das Zersägen der Probekörper wurden diese drei Tage bei einem Klima von  $20^\circ\text{C}$  und 50% relativer Luftfeuchte gelagert.

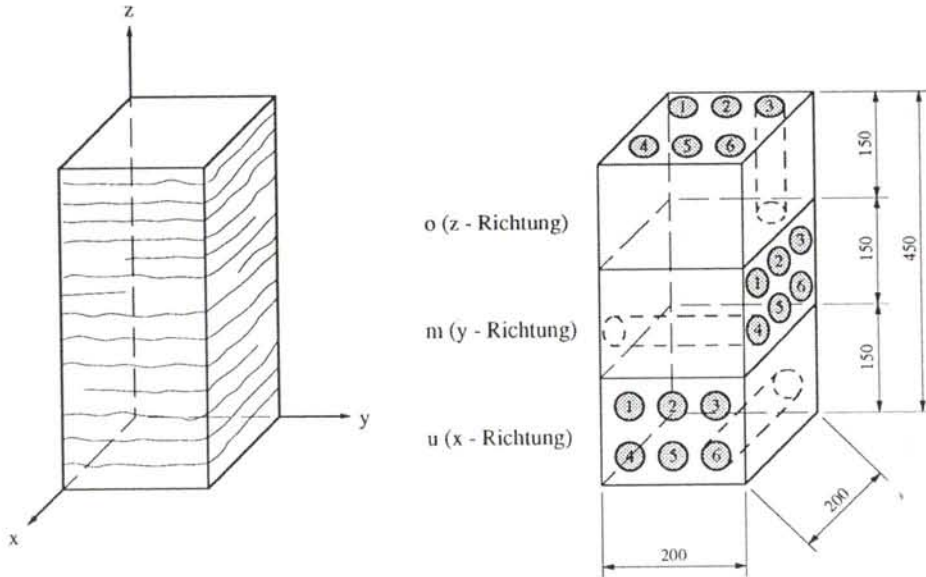


Abb. 2: Koordinatensystem mit z-Richtung senkrecht zur Schichtebene sowie gewählte x-, y- und z-Richtung bei der Bohrkerntnahme

Fig. 2: *Coordinate system with z-direction perpendicular to plane of stratification and chosen x-, y- and z-direction during core extraction*

### 3.2 Bestimmung der Schallgeschwindigkeit $v$

Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit  $v$  an den Natursteinproben erfolgte mit Ultraschallwellen der Frequenz  $f$  von 40kHz, was bei einer angenommenen Schallgeschwindigkeit  $v$  von  $3000\text{ms}^{-1}$  im Naturstein einer Wellenlänge  $\lambda$  von 75mm entspricht. Diese Wellenlänge  $\lambda$  gewährleistet, daß es nicht zu unerwünschten Beugungsphänomenen innerhalb des Natursteins kommt.

Daraufhin erfolgte die Ermittlung der Schallgeschwindigkeit  $v$  zuerst an den markierten Orten der Probekörper  $o_i$ ,  $m_i$ ,  $u_i$ , ( $i=1,\dots,6$ ), an denen nach erfolgreicher Bestimmung der Schallgeschwindigkeit  $v$  Bohrkern mit einem Durchmesser von  $\varnothing=50\text{mm}$  und einer Länge von  $l=145\text{mm}$  entnommen wurden. An diesen Bohrkernen wird wiederum die Schallgeschwindigkeit  $v_{\text{Bohr}}$  bestimmt. Dieses Vorgehen ermöglicht den Einfluß der Querabmessungen auf die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit  $v$  zu ermitteln. Es wurden 3 Messungen zur Bestimmung der Schalllaufzeit  $t$  durchgeführt und mit deren Mittelwert  $t_{\text{Mittel}}$  und dem vom Schall zurückgelegten Weg  $s$  die Schallgeschwindigkeit  $v_{\text{Bohr}}$  berechnet.

Daraufhin wurden die Mittelwerte der Schallgeschwindigkeiten  $v$  und  $v_{\text{Bohr}}$  sowie die entsprechenden Standardabweichungen  $\sigma$  verglichen. Die Werte für die Schallgeschwindigkeiten  $v$  und  $v_{\text{Bohr}}$  stimmten innerhalb der Meßgenauigkeit überein.



Es ergibt sich, daß die Werte der Schallgeschwindigkeit  $v$  an den untersuchten Savonière-Kalksteinproben zwischen  $2500\text{ms}^{-1}$  und  $3400\text{ms}^{-1}$  an den Sandsteinproben zwischen  $2300\text{ms}^{-1}$  und  $2800\text{ms}^{-1}$  und an den Jura-Kalksteinproben zwischen  $5100\text{ms}^{-1}$  und  $5600\text{ms}^{-1}$  liegen.

### 3.3 Bestimmung der Druckfestigkeit $f_c$

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde an den Bohrkernen der Natursteine, an denen die Schallgeschwindigkeit  $v$  gemessen wurde, die Druckfestigkeit  $f_c$  in einer Prüfmaschine bestimmt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug  $0.5\text{Nmm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Mit den gemessenen Werten der Schallgeschwindigkeit  $v$  und der Druckfestigkeit  $f_c$  der Laborproben hat man nun Daten, um die Druckfestigkeit  $f_c$  als Funktion der Schallgeschwindigkeit  $v$  darzustellen. Abb. 3 zeigt den Verlauf der Druckfestigkeit  $f_c$  als Funktion der Schallgeschwindigkeit  $v$  für Savonière-Kalkstein.

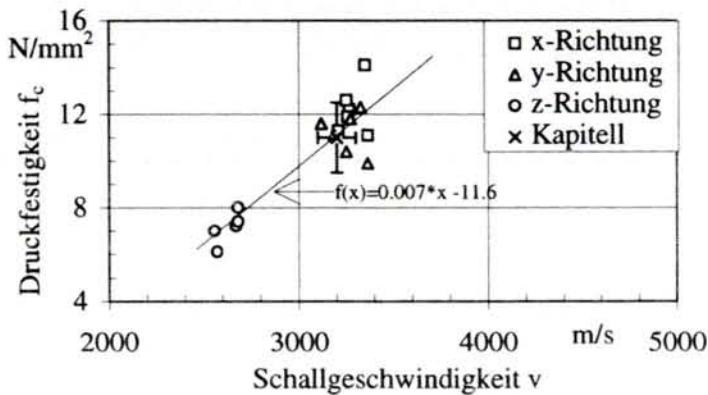


Abb. 3: Druckfestigkeit  $f_c$  als Funktion der Schallgeschwindigkeit  $v$  für Savonière-Kalkstein in x-, y- und z-Richtung

Fig. 3: Compressive strength  $f_c$  as a function of velocity  $v$  for Savonière-limestone in x-, y- and z-direction

Die Bestimmung der Druckfestigkeit  $f_c$  von 6 Bohrkernen ( $\varnothing=24\text{mm}$ ), die an einem Kapitell aus Savonière-Kalkstein in x-y-Richtung entnommen wurden, ergab eine mittlere Druckfestigkeit  $f_c = (11.0 \pm 1.5)\text{Nmm}^{-2}$ . Am gleichen Kapitell wurde die Schallgeschwindigkeit mit  $v = (3200 \pm 100)\text{ms}^{-1}$  gemessen. Die der Schallgeschwindigkeit von  $v = 3200\text{ms}^{-1}$  entsprechende Druckfestigkeit von  $f_c=11.0\text{Nmm}^{-2}$  am Kapitell ist in der Abb.3 dargestellt. Dieser gemessene Wert liegt innerhalb des Streubereichs der an den Laborproben gemessenen Druckfestigkeiten  $f_c$ . Die in der Abb. 3 dargestellte Ausgleichsgerade wurde durch lineare Regression ermittelt und ist in der Abb. 6 als Kalibrierkurve für den Savonière-Kalkstein dargestellt.

In der Abb. 4 und 5 sind die entsprechenden Druckfestigkeiten  $f_c$  der Laborproben aus Jura-Kalkstein und Sandstein als Funktion der Schallgeschwindigkeit  $v$  dargestellt.

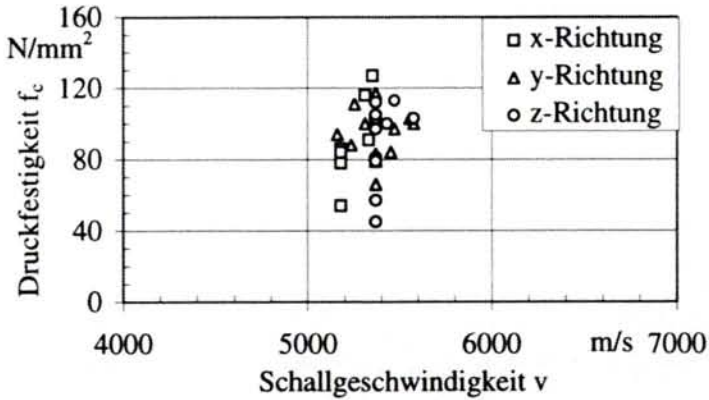


Abb. 4: Druckfestigkeit  $f_c$  als Funktion der Schallgeschwindigkeit  $v$  für Jura-Kalkstein in x-, y- und z-Richtung

Fig. 4: Compressive strength  $f_c$  as a function of velocity  $v$  for Jura-limestone in x-, y- and z-direction

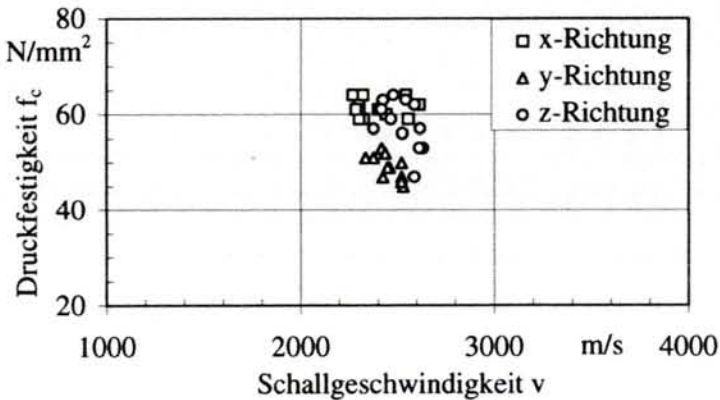


Abb.5: Druckfestigkeit  $f_c$  als Funktion der Schallgeschwindigkeit  $v$  für Schmerikoner-Sandstein in x-, y- und z-Richtung

Fig. 5: Compressive strength  $f_c$  as a function of velocity  $v$  for Schmerikoner-sandstone in x-, y- and z-direction

In der Abb. 6 ist die Druckfestigkeit  $f_c$  von Sandstein als Funktion der Schallgeschwindigkeit  $v$  dargestellt. Die Literaturdaten für den Sandstein wurden der Publikation von Felix [7] entnommen.

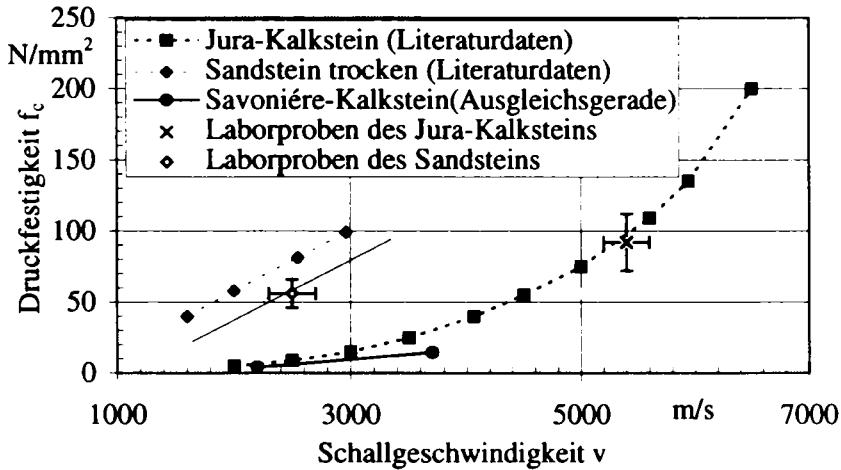


Abb. 6: Druckfestigkeit  $f_c$  als Funktion der Schallgeschwindigkeit  $v$  für Sandstein, Savonière- und Jura-Kalkstein

Fig. 6: Compressive strength  $f_c$  as a function of velocity  $v$  for sandstone and limestone

Man erkennt anhand der Abb. 6, daß die Druckfestigkeiten  $f_c$  der Laborproben aus Sandstein geringer als die Literaturwerte sind. Dies liegt daran, daß die Bohrkern der Laborproben naß gebohrt wurden und anschließend bei einem Klima von  $20^\circ\text{C}$  und 50% relativer Luftfeuchte 2 Tage gelagert wurden. Im Anschluß daran wurde die Druckfestigkeit  $f_c$  bestimmt. Da die Druckfestigkeit  $f_c$  von Sandstein mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt abnimmt [6], [13], müssen die Festigkeitswerte der Laborproben geringer sein als die Festigkeitswerte der im getrockneten Zustand getesteten Sandsteinproben. Der Verlauf der Druckfestigkeit  $f_c$  als Funktion der Schallgeschwindigkeit zu kleineren bzw. größeren Werten der Schallgeschwindigkeit  $v$  ist mit Hilfe einer Parallelen zu den Literaturdaten extrapoliert worden. Mit Hilfe der Kalibrierkurve kann man aus den an Bauteilen aus Naturstein gemessenen Werten der Schallgeschwindigkeit  $v$  deren Druckfestigkeit  $f_c$  näherungsweise bestimmen.

In der Abb. 6 ist desweiteren der Verlauf der Druckfestigkeit  $f_c$  von Kalksteinen als Funktion der Schallgeschwindigkeit  $v$  dargestellt. Der funktionelle Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit  $f_c$  und Schallgeschwindigkeit  $v$  ist einer Publikation von Honeyborne [11] entnommen. In der Abb. 6 sind außerdem die gemessenen Werte der Druckfestigkeit  $f_c$  als Funktion der Schallgeschwindigkeit  $v$  von den Laborproben eingezeichnet. Die Werte der Laborproben stimmen mit den Literaturdaten ausgezeichnet überein. Somit kann der in Abb. 6 dargestellte Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit  $f_c$  und Schallgeschwindigkeit  $v$  als Kalibrierkurve für die aus Jura-Kalkstein bestehenden Säulen übernommen werden. Mit Hilfe dieser Kalibrierkurve kann nun die Druckfestigkeit  $f_c$  der aus Jura-Kalkstein bestehenden Bauteile zerstörungsfrei durch die Messung der Schallgeschwindigkeit  $v$  näherungsweise bestimmt werden.



#### 4. Messungen an Bauteilen

##### 4.1 Mittlere Festigkeit als Funktion der Säulenhöhe $h$

Die zerstörungsfreie Bestimmung der Festigkeit erfolgte an Säulen und Kapitellen aus Naturstein an einem etwas mehr als 100 Jahre alten Gebäude.

Für die Bestimmung der Druckfestigkeit  $f_c$  ist es erforderlich, den vom Ultraschall zurückgelegten Weg  $s$  und die dafür benötigte Zeit  $\tau$  zu messen. Um eine Aussage über die Streuung der Schallgeschwindigkeit  $v$  innerhalb eines Bauteils machen zu können, wurde an allen Bauteilen in 4-10 definierten Richtungen die Schallgeschwindigkeit  $v$  in einer Ebene und als Funktion der Säulenhöhe  $h$  ermittelt.

Mit den gemessenen Werten für die Schallgeschwindigkeit  $v$  wurde die Druckfestigkeit  $f_c$  aus der in Abb. 6 dargestellten Kalibrierkurve für die aus Savonnière-Kalkstein bestehenden Bauteile ermittelt. Für die Bauteile, die aus Jura-Kalkstein bzw. Sandstein bestehen wurde die Druckfestigkeit  $f_c$  ebenfalls durch die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit  $v$  mittels Abb. 6 bestimmt.

Beispielhaft sind in der Abb. 7 die zerstörungsfrei ermittelten Festigkeiten von zwei Säulen S1 und S2 aus Jura-Kalkstein als Funktion der Säulenhöhe  $h$  in vier unterschiedlichen Richtungen dargestellt. Die Definition der vier untersuchten Richtungen ist in der Abb. 8a dargestellt.

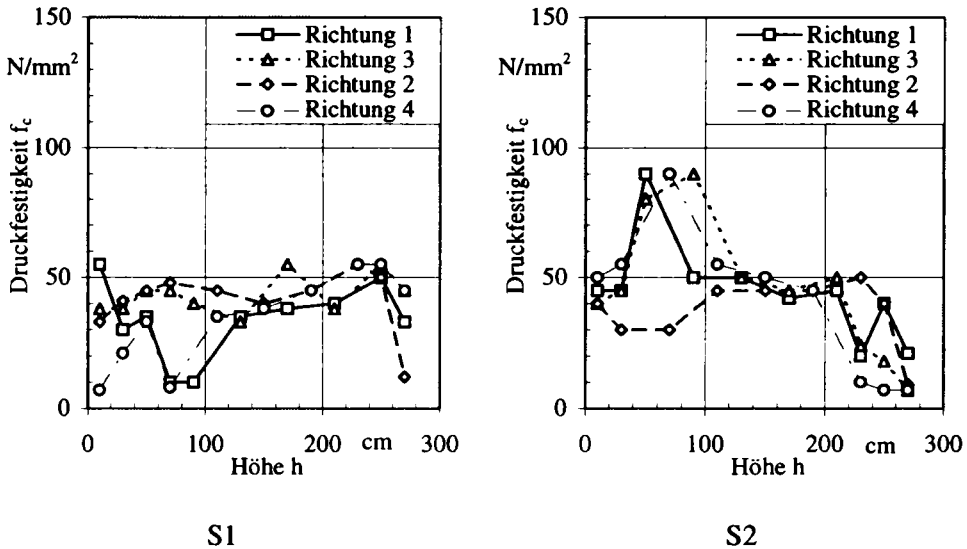


Abb. 7: Druckfestigkeit  $f_c$  der Säulen S1 und S2 als Funktion der Säulenhöhe  $h$   
 Fig. 7: Compressive strength  $f_c$  of columns S1 and S2 as a function of height  $h$

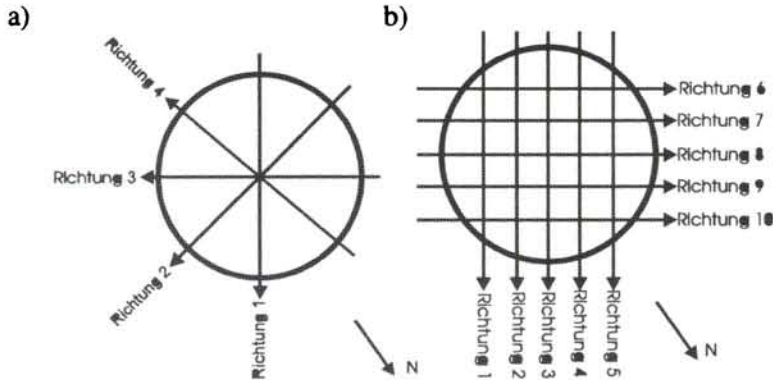


Abb.8: Definition der untersuchten Richtungen bei den Säulen S1 und S2 bei grobem (a) und feinerem (b) Raster

Fig. 8: Definition of the investigated directions of columns S1 and S2 using a coarse (a) and a fine (b) raster

#### 4.2 Orten von Fehlstellen

Am Beispiel der Säulen S1 und S2 wird das Orten einer Fehlstelle erläutert. Aus diesem Grund sei zunächst auf die Abb. 7 verwiesen. Auffallend ist, daß die Werte der Druckfestigkeit  $f_c$  bei der Säule S1 bei einer Säulenhöhe  $h$  von 70cm bei der Säule S1 in den Richtungen 1 und 4 wesentlich tiefer liegen als bei den Vergleichswerten von den Richtungen 2 und 3. Dies ist ein Hinweis auf eine Fehlstelle. Aus diesem Grund wird die Säule S1 bei einer Säulenhöhe  $h$  von 60 bis 70cm in einem feineren Raster untersucht. Der Abstand der Meßebenen wird zusätzlich von 20cm auf 5cm reduziert. Der Grund dieses Vorgehens ist das Lokalisieren der Fehlstelle. Die Definition der untersuchten Richtungen bei diesem feineren Raster ist in der Abb. 8b dargestellt.

Die Druckfestigkeit  $f_c$  ermittelt nach dem feineren Raster ist für Säule S1 in 10 verschiedenen Richtungen in der Abb. 9 grafisch dargestellt.

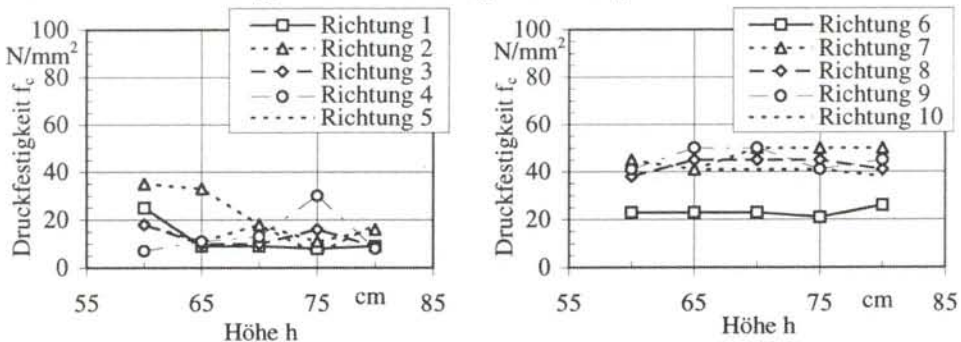


Abb. 9: Druckfestigkeit  $f_c$  als Funktion der Säulenhöhe  $h$  für Säule S1

Fig. 9: Compressive strength  $f_c$  as a function of column height  $h$  for column S1

In der Abb. 10a ist die gefundene Fehlstelle der Säule S1 in der untersuchten Meßebene bei der Säulenhöhe  $h$  von 70cm dargestellt.

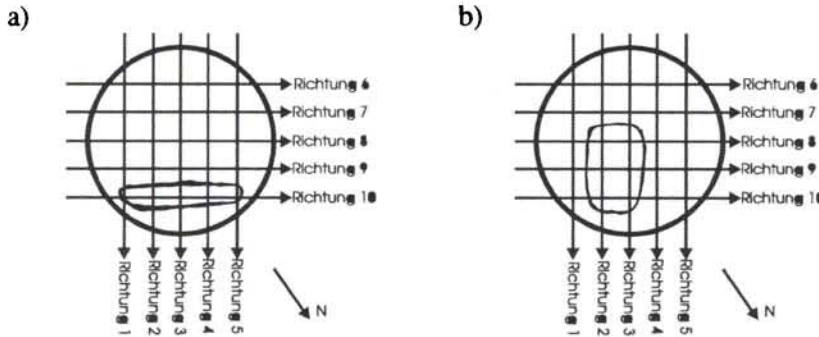


Abb. 10: a) Fehlstelle der Säule S1 bei  $h=70\text{cm}$  und b) Fehlstelle der Säule S2 bei  $h=260\text{cm}$

Fig. 10: (a) Defect of column S1 by height  $h=70\text{cm}$  and (b) defect of column S2 by height  $h=260\text{cm}$

Als nächstes betrachten wir den Verlauf der Druckfestigkeit  $f_c$  bei der Säule S2 in der Abb. 7. Hier fällt der Abfall der Festigkeit der Säule 2 oberhalb von 200cm auf. Aus diesem Grund wurden bei der Säule 2 ab der Höhe  $h$  von 205cm ebenfalls mit dem in der Abb. 8b dargestellten feineren Raster im Abstand von 5cm die Festigkeiten ermittelt. Die Resultate dieser Messungen sind der Abb. 11 dargestellt.

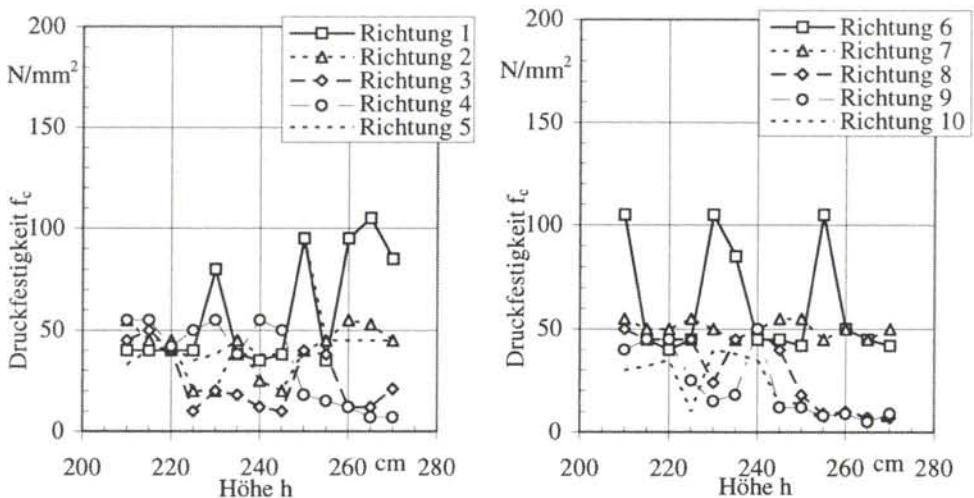


Abb. 11: Druckfestigkeit  $f_c$  als Funktion der Säulenhöhe  $h$  für Säule S2 bei feinerem Raster

Fig. 11: Compressive strength as a function of column height  $h$  for column S2 using a fine raster

Betrachtet man in der Abb. 11 bei einer Höhe  $h$  von 260cm die Festigkeit in der untersuchten Ebene, so ist der Abfall der Festigkeit in den Richtungen 2 und 3, sowie den Richtungen 8,9 und 10 gegenüber den anderen in der Abb. 11 dargestellten Richtungen markant. Dies läßt den Rückschluß zu, daß im Kreuzungsbereich der Richtungen 2,3 sowie 8,9 und 10 eine Fehlstelle vorhanden sein muß (Abb. 10b).

## 5. Folgerungen

Die vorgestellte zerstörungsfreie Methode ist geeignet die verbleibende Festigkeit von beschädigten Bauteilen aus Naturstein näherungsweise zu bestimmen. Desweiteren hat man mit der vorgestellten Meßmethode die Möglichkeit zerstörungsfrei Fehlstellen zu lokalisieren. Aufgrund der höheren Sensitivität der Ultraschallamplitude [4] und der Impulsform [14] gegenüber Fehlstellen, wäre jedoch für zukünftige, zerstörungsfreie Analysen an Natursteinen die gleichzeitige Messung von Ultraschallgeschwindigkeit  $v$ , Ultraschallamplitude  $A$  und Ultraschallimpulsform bei Durchstrahlung in Betracht zuziehen.

Beschädigte Bauteile können mit dieser Methode klassifiziert werden. Entsprechende Instandsetzungsmaßnahmen können auf dieser Basis zielgerecht entwickelt werden.

## 6. Literatur

- [1] Dannenberg, F. K.: Zwei neue Verfahren zur Bestimmung von Gesteinsfestigkeiten: Ultraschall und Los-Angeles-Test, Felsbau, Fachzeitschrift für Geomechanik und Ingenieurgeologie im Bauwesen und Bergbau, Verlag Glückauf, Jahrgang 4, 1986, Nr.1
- [2] Di Tommaso, A. et al.: Dissesti di strutture monumentali: una diagnosi dello stato fessurativo di alcuni capitelli in Bologna, 3° Convegno Naz. „Indagini non distruttive per il controllo di qualità e la diagnostica delle opere di ingegneria civile“, Bologna, SAIE 1987, pp. 293-322; Costruzioni, N. 440, Luglio 1992, pp. 767-777
- [3] Di Tommaso, A. et al.: Detection of internal fissures on rock structural elements of historical buildings, Inter. Conf. on Fracture and Damage of Concrete and Rock Vienna, 1988, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 35, N. 1/2/3, 1990, pp. 473-493
- [4] Di Tommaso, A. et al.: Experimental microseismic evaluation of artificially induced defects on stonework, Fracture of concrete and rock: Recent developments, Eds. S.P. Shah, S.E. Swartz, B. Barr, London, Elsevier Applied Science, 1989, pp.265-277
- [5] Di Tommaso, A. et al.: Damage detection and repair control of marble elements, IABSE Symposium, Structural Preservation of the Architectural Heritage, Roma, 1993, pp. 245-252

- [6] Esbert, R. M. et al.: Ultrasonic velocity and humidity in monumental stones, in: Science, technology and european cultural heritage, Proceedings of the European Symposium, Bologna, Italy, 13-16 June 1989, editors: Baer, N.S., Sabbioni, C., Sors, A.I.
- [7] Felix, C: Propriétés physiques de huit grès, dont celui dit grès de la fontaine, provenant d'Allemagne, Chantiers/Suisse, Vol.18, 8/1987, pp. 711-720
- [8] Fitzner, B., Heinrichs, K.: Verwitterungszustand und Materialeigenschaften der Kalksteine des Naumburger Doms, in: Jahresberichte aus dem Forschungsprogramm Steinzerfall-Steinkonservierung, Band 2, 1990, ISBN 3-433-01243-1
- [9] Galan, E. et al.: Marble weathering: Relation between ultrasonic data and macroscopic observations. The case of the columns of the court of the lions at the alhambra in Granada, Spain, in: The conservation of monuments in the mediterranean Basin, Proceedings of the 2nd International Symposium, Genève, 19-21 novembre 1991, editors: Decrouez, D., Chamay, J., Zezza, F.
- [10] Guerrero, M. A. et al.: The physical-mechanical properties and ultrasonic data as criteria for evalution of calcareous stone decay, in: The conservation of monuments in the Mediterranean Basin, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium, Bari 1989, editor: Zezza, F., ISBN-3-540-15754-9
- [11] Honeyborne, D.: The building limestones of France , Building Research Establishment Report, Department of the Environment, London , Her Majesty's Stationery Office
- [12] Krautkrämer, J., Krautkrämer, H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall, 5. Auflage, Springer-Verlag, 1986, ISBN-88-7385-060-x
- [13] Schwarz, W., Venzmer, H.: Neue Möglichkeiten und Grenzen der zerstörungsfreien Ultraschallfeuchtemessung an Werkstoffen des Mauerwerks, Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, 1. Jahrgang, Heft 1, 1995, ISSN 0947-4498
- [14] Sträßer, M., Kloth, E.: Erfahrungen bei der zerstörungsfreien Abnahmeprüfung von Kohlenstoffsteinen nach dem Ultraschall-Durchschallungsverfahren, Materialprüfung, 18, 1976, Nr. 9
- [15] Simon, S. et al.: The marble columns in the cloister ot the Primatial church St. Trophime in Arles, France , in: The conservation of monuments in the Mediterranean Basin, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium, Venice, 22-25 June 1994, editors: Fassina, V., Ott, H., Zezza, F.



- [16] Zezza, F.: Computerized analysis of stone decay in monuments, in: The conservation of monuments in the Mediterranean Basin, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium, Bari 1989, editor: Zezza, F., ISBN-3-540-15754-9